



TITLE:

宇宙重力波干渉計LISAを用いた軌道周期が短い銀河系内の連星中性子星の観測可能性(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

西野, 裕基

CITATION:

西野, 裕基. 宇宙重力波干渉計LISAを用いた軌道周期が短い銀河系内の連星中性子星の観測可能性. 京都大学, 2019, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2019-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21949>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開

(続紙 1)

京都大学	博士（理学）	氏名	西野 裕基
論文題目	The possibility for detecting the shortest period Galactic neutron star binary in the LISA-SKA era		
(論文内容の要旨)			
<p>連星中性子星はマルチメッセンジャー天文学の時代において最も魅力的な研究対象の1つである。2017年には連星中性子星の合体衝突現象(GW170817)が重力波および電磁波で観測され、注目を集めた。この合体現象の観測および理論予測との比較検討によって、高密度核物質の状態方程式、合体後に放出される中性子過剰な質量放出におけるr過程元素合成とキロノバ(マクロノバともよばれる)、継続時間の短い種族のガンマ線バーストの起源について多くの知見が得られている。これまでの重力波観測から我々の近傍の宇宙での連星中性子星の合体率はLIGO-Virgo研究チームによって$1540^{+3200}_{-1220}\text{Gpc}^{-3}\text{yr}^{-1}$と推定されている。本論文では、この推定値から我々の銀河系内にも数万年以内に合体する連星中性子星(軌道周期で10分程度、重力波周波数で数ミリヘルツ)が数個から数十個程度は存在しているという見積もりを基礎に将来の観測可能性に関する議論を展開している。</p> <p>本論文の第2章では、短い軌道周期の連星中性子星がパルサーとして発見されることが物理学・天文学の領域でどのような意義があるのかを多角的に論じている。まず、基礎物理学の観点からは、長期観測によって多様な修正重力理論のパラメータを制限できる可能性がある。次に、軌道周期10分程度の連星の場合、連星の軌道長半径は10^{10}センチメートル程度になる。このように接近した連星同士の磁気圏(光円柱)は、スピン周期にもよるが、互いに接触している場合もある。磁気圏の相互作用を調べることで、未解明のパルサー磁気圏について多くの情報がもたらされると期待できる。また、短周期連星中性子星の電磁波および重力波による探査によって、連星合体率やパルサーのビーミング率等をより正確に精密に推定できる可能性がある。これらの値は、大質量星の進化・大質量星連星の進化に関連し、重元素の起源など銀河の化学進化の解明にも寄与すると期待されることを論じている。</p> <p>以上のように、短周期連星中性子星をマルチメッセンジャーで発見することが期待されているにもかかわらず、従来の電波パルサー探査の手法ではパルサーの電波信号の発見が難しいことを申請者は定量的に議論した。電波望遠鏡が受信する周波数ごとのサンプリングした時系列データを高速フーリエ変換（Fast Fourier Transformation, FFT）し、周波数空間でスピン周期に比例するモードを探索する手法が一般的に用いられている。しかし、この手法を対象の連星中性子星に適用すると、パルスの到着時間がDoppler変調によって変動し周波数空間で信号は周辺の周波数に分散するため信号雑音比が低減し発見が困難になる。これは、従来のパルサー探査においても困難の1つとして認知され、部分的には解決手法が提案されていたが、その適用範囲は軌道周期が長いものに限られてい</p>			

た。軌道周期の短いものについてDoppler変調をコヒーレントに補正するためには莫大な試行パラメータ空間に対してFFTを行う必要があり、計算コストの観点から現実的には実行が困難であった。申請者はブラインド探査におけるこの解析上の問題を指摘し、これを解決するために連星からの重力波の観測結果を利用することを提案した。

本論文の第3章では、連星中性子星の重力波観測によってどのような知見が得られるのか示している。まず、2030年代の建設を目指している宇宙重力波干渉計The Laser Interferometer Space Antenna (LISA)によって、銀河系内の短周期連星を高い信号雑音比で観測できることを指摘した。LISAの重力波の長期観測によって、短周期連星の一部のパラメータを極めて精度よく決定することが可能になる。本章ではこのうち電波観測で大きな障害となるDoppler変調を補正するために必要なパルサーの軌道パラメータの決定精度を評価した。具体的にはこれらのパラメータを含む形で重力波形を定式化し、LISAの設計感度を用いてFisher解析を行った。そして、数値計算を実行して、パラメータ推定誤差を系統的に分析した。

本論文の第4章では、連星中性子星についての種々のパラメータ制限(天球面上での位置や軌道情報)によって、パルサーの電波探査の計算コストを低減できるのかを定量的に述べている。LISAと同時期の建設完了を目標としている電波干渉計The Square Kilometer Array (SKA)の第二段階(Phase 2)における感度性能を前提に議論している。ブラインド探査の場合には連星の方向だけではなく連星の軌道情報(周波数、周波数の時間変化、初期位相など)が未知であるので、データ解析に必要な演算量が大きくなり、SKAが想定する実時間解析ではパラメータ探査が難しいことを示す一方で、LISA情報を用いた解析では、SKAで設置予定のエクサスケールのスーパーコンピュータによって十分に実時間解析が可能であることを明らかにした。また、申請者は、LISAによるパラメータ推定を用いた探査手法が、LISAの観測期間外においても有効かどうかを理論モデルによって調べた。LISAの観測期間外に外挿すると、連星の軌道位相の誤差は急激に大きくなるので、(天球面上での位置や重力波の周波数などと異なり、)位相の推定は期間外では有効でない懸念があることを示した。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は軌道周期の短い連星中性子星の将来的な電波・重力波観測について研究したものである。申請者は、強く重力的に束縛され相対論的な軌道運動をする連星中性子星について理論的に研究を行なった。物理学的・天文学的な観点から短周期連星を観測する強い動機を申請者は本論文第2章で論じている。その結果の一部は学術誌The Astrophysical Journal Letterの査読を通っている。

短周期連星は電波観測の際に必要なパラメータ探索空間が莫大で、ブラインド探索が困難であった。申請者は、重力波から引き出した連星の方向や軌道情報を利用することで、電波のデータ解析の演算量が現実的に可能な範囲となることを提案した。電波観測に有益なパラメータを重力波から推定可能かどうかを確かめるためにFisher解析を行い、連星パラメータがどの程度の決定精度で推定可能かを系統的に明らかにした。加えて、短周期連星中性子星を発見するために理想的なコヒーレントな信号解析をするとした際に、前知識なしでブラインド探索する場合とLISAの情報をもとに探索する場合の計算コストを定量的に比較している。その結果を考量してパルサーの電波観測の可能性を検討した点は新しい知見であり、価値あるものと評価できる。この結果は学術誌Monthly Notices of the Royal Astronomical Societyの査読を通っている。さらに、申請者は解析手法の適用の限界についても考慮し、LISAとSKAの観測計画が同期して遂行されるときに、電波のデータ解析の観点から望ましいことも指摘している。以上は、重力波と電磁波観測にまたがる成果で、今後の発展が約束されているマルチメッセンジャー天文学における新しい知見である。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年2月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降